

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Talotekniikan koulutusohjelma

Pentti Pussinen

AURINKOSÄHKÖTUOTANNON VAIKUTUKSET JAKELUVERKON PIENJÄN-
NITEVERKKOON

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2018



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2018
Talotekniikan koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
013 260 600

Tekijä(t)
Pentti Pussinen

Nimeke
Aurinkosähkötuotannon vaikutukset jakeluverkon pienjänniteverkkoon

Toimeksiantaja Voimatel Oy

Tiivistelmä

Jakeluverkkoihin liitetyt mikrotuotantolaitokset ovat lisääntyneet kuluttajien kiinnostuttua ympäristöystävällisimmistä energiantuotantomuodoista. Tämän opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää, mitä verkostovaikutuksia voi syntyä jakeluverkon pienjänniteverkkoon, kun siihen on liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Opinnäytetyössä toimeksiantajana oli Voimatel Oy.

Opinnäytetyössä käsiteltiin aurinkosähkötuotantoa, aurinkosähköjärjestelmän rinnan käyttöä pienjännitejakeluverkon kanssa sekä tarkasteltiin verkkoinvertteriltä ja etäluettavalta erilliseltä energiamittarilta saatavaa mittaustietoa asiakkaan liityntäpisteessä. Saatuja mittaustuloksia voidaan hyödyntää pienjänniteverkon sähkön laadun tarkkailussa. Opinnäytetyössä selvitettiin myös verkkoinvertterin toiminnollisuutta sähkön laadun hallinnassa.


Opinnäytetyössä on tuotu esille, kuinka erillisen energiamittarin ja verkkoinvertterin mittaustuloksia tarkastelemalla saadaan tietoa sähkön laadusta ja mihin asioihin täytyy kiinnittää huomiota kytkettäessä pientuotantoa rinnan pienjännitejakeluverkon kanssa. Tulevissa opinnäytetöissä voidaan selvittää verkkoinvertterin mahdollisuutta osallistua jännitteen säätöön loistehon avulla ja näin vaikuttaa suoraan pienjänniteverkon sähkön laatuun. Etäluettavan erillisen energiamittarin käyttöä kannattaa hyödyntää tulevaisuudessa myös enemmän sähkön laadun tarkkailussa.

Kieli
suomi

Sivuja 31
Liitteet 1

Asiasanat

aurinkosähköjärjestelmä, pienjännitejakeluverkko, verkkoinvertteri, etäluettava energiamittari

	<p>THESIS March 2018 Degree Programme in Building Services Engineering</p> <p>Tikkarinne 9 80220 JOENSUU FINLAND 013 260 600</p>	
<p>Author (s) Pentti Pussinen</p>		
<p>Title Production of Solar Electricity in a Low-Voltage Distribution Network</p> <p>Commissioned by Voimatel Oy</p>		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to investigate the effects of connecting solar photovoltaic systems to a low voltage distribution network. The thesis deals with the production of solar electricity and the use of solar photovoltaic systems with the low voltage network. This thesis was commissioned by Voimatel Oy.</p> <p>Data for this thesis was obtained from the inverter and smart energy meter. In addition, electro-technical dimensioning of the distribution network was calculated.</p> <p>It was concluded that the quality of supply can be studied with the help of the measurement results. In addition, it was shown what kind of things have to be taken into account when the micro production is connected in parallel with the low voltage distribution network. This information can help to develop solar photovoltaic systems and the quality of supply.</p>		
<p>Language</p> <p>Finnish</p>		<p>Pages 31</p> <p>Appendices 1</p>
<p>Keywords</p> <p>solar photovoltaic system, low voltage distribution network, inverter, energy meter</p>		

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto	6
2	Aurinkosähkötuotanto.....	7
2.1	Aurinkoenergia	7
2.2	Aurinkosähkö.....	7
2.3	Aurinkosähköjärjestelmä	9
3	Pienjänniteverkko	9
3.1	Sähkön laatu pienjänniteverkossa	9
3.2	Pienjänniteverkon suojaaminen.....	14
4	Mikrotuotanto	15
4.1	Mikrotuotannon liittäminen pienjänniteverkkoon	15
4.2	Mikrotuotantolaitoksen kytkeytyminen ja irtoaminen verkosta	16
4.3	Loss of Mains -suojaus.....	17
4.4	Mikrotuotantolaitoksen syöttämät oikosulkuvirrat	18
5	Mikrogeneraattori	21
5.1	Mikrogeneraattorin rinnan käyttö pienjänniteverkon kanssa.....	21
5.2	Invertteriin perustuva mikrogeneraattori	21
5.3	Mikrogeneraattorin ohjaustavat	22
6	Esimerkkikohde	24
6.1	Aurinkosähköjärjestelmä	24
6.2	Mittaus.....	25
6.3	Laskuesimerkkejä.....	27
7	Pohdinta	28

Liitteet

Liite 1

Aurinkosähköjärjestelmän sähkökaavio

Käytetyt lyhenteet ja termit

AMKA	Pienjänniteriippukaapeli
kVA	Kilovolttiampeeri
LoM	Loss of Mains, Saarekekäytönestosuojaus
P	Pätöteho
Q	Loisteho
U_n	Nimellisjännite
Wh	Wattitunti
Wp	Aurinkopaneelin nimellisteho

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käsitellään sähkön pientuotantoa aurinkosähköjärjestelmän avulla. Opinnäytetyössä kuvataan, mitä sähkön laadullisia vaikutuksia on sähkönjakeluverkkoon, kun siihen on liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Opinnäytetyön tehtävänä oli tarkastella aurinkosähköjärjestelmän rinnan käyttöä haja-asutusalueella sijaitsevan pienjännitejakeluverkon kanssa. Opinnäytetyössä selvitettiin pilottikohteessa olevan verkkoinvertterin ja erillisen energiamittarin mittaustietojen hyödynnettävyyttä pienjänniteverkon sähkön laadun tarkkailussa. Opinnäytetyössä on tuotu esille, mitä asioita täytyy ottaa huomioon mitoituksessa ja käytössä, kun liitetään pientuotantoa rinnan jakeluverkon kanssa.

Aurinkoenergiatuotanto kiinnostaa suomalaisia sähkönkäyttäjiä ja aihe on ajankohtainen aurinkosähköjärjestelmien yleistyessä. Kiinteistön omistajat haluavat ympäristöystävällisempiä energiantuotantomuotoja. Aurinkosähköjärjestelmien verkostovaikutuksista on jakeluverkossa toimivilla yrityksillä vielä vähän tutkittua tietoa. Haasteita tuotantojärjestelmien ja jakeluverkkojen suunnittelun parissa työskenteleville aiheuttaa erityisesti laitteiden suojaaminen ja liityntäpisteessä riittämätön oikosulkuteho suhteessa pienvoimalan nimellistehoon.

Opinnäytetyössä toimeksiantajana oli Voimatel Oy. Voimatel on suomalaisomisteinen sähkö- ja tietoverkko ratkaisujen ja elinkaaripalvelujen toteuttaja. Suomessa keskeisimmät siirto- ja jakeluverkkoyhtiöt, kansainväliset laitevalmistajat, tuotantoyritykset ja kuntasektori ovat Voimatelin asiakkaita. Ulkomailla Voimatelin asiakkaita ovat muun muassa Itämeren alueella ja Keski-Euroopassa palvelevat teleoperaattorit. Tämä opinnäytetyö on tehty Voimatelin sähköverkkopalveluihin, jossa varmistetaan sähköjakelun kokonaisvaltainen toimivuus tuotannosta aina loppukäyttäjille saakka. Voimatelin omistaa kuopiolainen Osuuskunta KPY. [1.]

2 Aurinkosähkötuotanto

2.1 Aurinkoenergia

Nykytietämyksen mukaan aurinko on kaasupallo, jonka ulkokuoren suurimmaksi osaksi muodostavat vety (75 %) ja helium (23 %). Auringosta saatava säteilevä energia on peräisin auringon ytimessä tapahtuvasta fuusioreaktiosta. Tässä fuusioreaktiossa kaksi vetyatomin ydintä yhtyy heliumatomin ytimeksi, jolloin suuri määrä energiaa vapautuu. Yhden heliumkilon muodostaminen vedystä vapauttaa energiaa yhtä paljon kuin 27 000 tonnia kivihiiltä eli 180 miljoonaa kilowattituntia. Tämä reaktio vaatii korkean lämpötilan onnistuakseen. Auringon sisällä vallitsee 10 miljoonan asteen lämpötila, jossa fuusioprosessi tapahtuu. Auringon pintalämpötila on 5 500 astetta celsiusta. [2, 11.]

Lämpöydinreaktion aiheuttaman massamuutoksen seurauksena vapautuva energia antaa auringolle kokonaistehon, joka on $3,8 \cdot 10^{23}$ kilowattia. Maapallolle tulee tästä määrästä $1,7 \cdot 10^{14}$ kilowattia, joka on noin 10 000 kertaa se teho, jonka koko ihmis-kunta käyttää vuodessa vuoden 2008 kulutustietojen perusteella laskettuna. [2, 12–13.]

Maapallon ilmakehän ulkopuolella säteilyä vastaan kohtisuorassa olevalle, neliömetrin kokoiselle pinnalle tulevaa aurinkosäteilyn tehoa kutsutaan aurinkovakioksi. Aurinkovakio on keskimäärin noin $1,368 \text{ kW/m}^2$. Maanpinnalla saadaan parhaimmillaan noin 1 kW/m^2 säteilyteho, kun ilmakehä heijastaa ja suodattaa osan tulevasta säteilystä. [2, 13.]

2.2 Aurinkosähkö

Aurinkosähkön hyödyntämisessä suomalaisilla on pitkät perinteet. Kesä mökeillä suomalaisilla on käytössä noin 80 000 mökkisähköjärjestelmää. Nämä mökkisähköjärjestelmät eivät ole kuitenkaan liitettynä yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Suomeen on

asennettu lokakuuhun 2015 mennessä noin 8 megawatin edestä aurinkosähköjärjestelmiä, jotka ovat liitettyinä sähkönjakeluverkkoon. Esimerkiksi Saksassa on 5000 kertaa enemmän aurinkosähköjärjestelmiä kuin Suomessa. Samanlaisilla aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa energiaa melkein yhtä paljon niin Pohjois-Saksassa kuin Etelä-Suomessa. Aurinkoenergiajärjestelmien kotimaisuusaste on 50 - 70 % ja ala on Suomessa voimakkaassa nosteessa. [3, 42.]

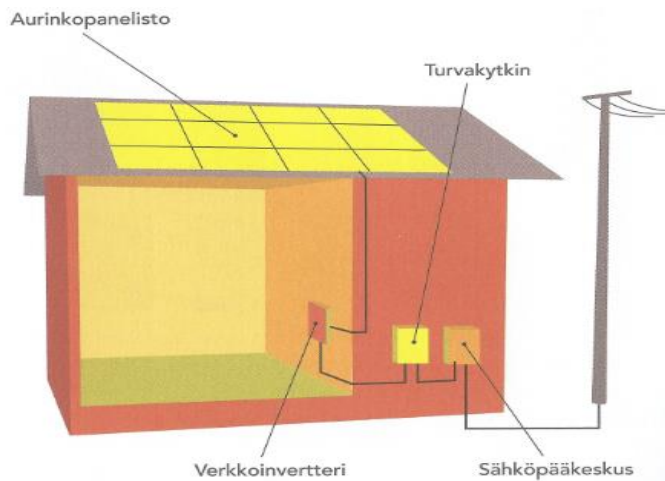
Kiinteistökäytössä olevat aurinkopaneelit ovat tyypeiltään yleensä yksikide- ja monikidepaneeleita. Yksikidepaneeli on koottu käyttämällä hyväksi yksikiteisestä piistä sahattuja pyöreitä piikiekkoja. Kun pyöreitä piikiekkoja leikataan, niiden aktiivista pinta-alaa saadaan suuremmaksi. Yksikidepaneelissa kiderakenne on suunnan kannalta yhtenäinen ja sen ansiosta hyötysuhde sillä on erinomainen, kun aurinko paistaa siihen optimaalisesta suunnasta. [3, 57.]

Monikidepaneelin kiderakenne ei ole samalla tavalla yhtenäinen kuin yksikidepaneelissa ja siksi sen hyötysuhde myös jää pienemmäksi. Monikidepaneelissa varjostus ei tuota niin isoa ongelmaa kuin yksikidepaneelissa, minkä vuoksi monista suunnista tuleva valo saadaan helpommin muutettua sähköenergiaksi. Monikidepaneelin puolijohteesta saadaan muokattua helpommin juuri oikean kokoinen ja aurinkopaneelin koko pinta-ala on hyödynnettävissä tehokkaasti. Monikidepaneeleita käytetään yleisesti aurinkokennoissa. Aurinkopaneeleissa ilmoitettava hyötysuhde kertoo, kuinka paljon siihen osuvasta auringon säteilyintensiteetistä se kykenee muuttamaan sähköenergiaksi. [3, 57.]

Molemmilla aurinkopaneelityypeillä päästään kiinteistökäytössä hyvään lopputulokseen. Molemmat ovat myös tekniseltä käyttöiältään useita kymmeniä vuosia. Aurinkopaneeleiden hyötysuhteilla ei ole niin suurta merkitystä vaan tärkeämpää on, kuinka paljon kokonaiskustannuksia tulee tuotetulle sähkölle. Tällä hetkellä asennettaviin järjestelmiin valitaan usein monikidepaneeli, koska tällä ratkaisulla kokonaiskustannukset jäävät pienemmiksi alhaisemmasta hyötysuhteesta huolimatta. [3, 58–59.]

2.3 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmien kytkeminen verkkoon on sähköurakointioikeuksien alaista työtä niin tasavirran kuin vaihtovirrankin osalta. Aurinkosähköjärjestelmä, joka on liitetty kiinteistöön, on rakenteeltaan yksinkertainen (kuva 1). Siinä on aurinkopaneeleiden lisäksi verkkoinvertteri ja turvakytin, joka sijaitsee vaihtosähköpuolella. [3, 72.] Verkkoinvertterin huoltamisen ja vaihtamisen mahdollistamiseksi on tasasähköpuolella myös oltava sopiva erotuslaite (liite 1) [4, 20]. Aurinkopaneelit tuottavat tasavirtaa, jonka verkkoinvertteri muuttaa vaihtovirraksi. Verkkoinvertteri kytketään sähköpääkeskukseen tai ala-keskukseen syötön puolelle. Sen tehtävänä on muun muassa huolehtia verkon suojauksista ja synkronoitua verkon kanssa. Aurinkosähköjärjestelmän tuottama sähkö käytetään pääasiassa oman kiinteistön energian kulutuksessa ja vasta toissijaisena vaihtoehtona on myydä sitä sähkönjakeluverkkoon. [3, 72.]



Kuva 1. Kiinteistön aurinkosähköjärjestelmä [3, 72].

3 Pienjänniteverkko

3.1 Sähkön laatu pienjänniteverkossa

Pienjänniteverkkoa syöttävä jännite muutetaan Suomessa jakelumuuntamolla suuremmasta 20 kV:n jännitteestä 400 V:iin . Pienjänniteverkossa suojaus hoidetaan oikosulku- ja ylikuormitussuojauksen osalta jakelumuuntamolla sijaitsevilla sulakkeilla.

Kaupunkien keskustoissa ja tiheään rakennetuilla alueilla käytetään pienjänniteverkkoratkaisuissa maakaapelointia ja jakelumuuntamoita, jotka sijaitsevat kerrostalojen kellareissa tai erillisissä puistomuuntamoissa. Haja-asutusalueilla pylväsmuuntamo ja AMKA-riippukierrejohto ovat perinteiset pienjänniteverkkoratkaisut maakaapeloinnin kuitenkin yleistyessä nopeasti. [5, 157, 160.] Kuvassa 2 on esitetty haja-asutusalueella sijaitseva pylväsmuuntamo.



Kuva 2. Pylväsmuuntamo

Suomalainen standardi SFS-EN 50160 käsittelee jakelujännitteen pääominaisuuksia sähkönkäyttäjän liittymiskohdassa. Standardissa annetaan rajat ja arvot jännitteen

ominaisuuksista liittämiskohdassa. Standardissa SFS-EN 50160 käsiteltyjä jakelujännitteeseen ja käyttövarmuuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat muun muassa verkkotaajuus, jakelujännitteen suuruus, jännitetaso vaihtelut ja harmoninen yliaaltojännite. [5, 249–251.]

Kyseessä olevaa standardia ei tule kuitenkaan soveltaa pienvoimaloiden liittämisessä verkkoon. Suositeltavana ohjeena voidaan käyttää Sähköenergialiitto ry Senerin teettämää julkaisua pienvoimaloiden liittämisestä jakeluverkkoon, koska nykyaikaisten laitteistojen pitää Senerin julkaisun [6, 12] mukaan saavuttaa parempi jännitteen laatutaso kuin standardissa SFS-EN 50160 sanotaan. Tarvittaessa standardia voidaan käyttää referenssinä, mutta se ei ole suunnittelun apuväline. Yleensä kaikki verkkoon liitettävät pienvoimalat vaikuttavat välillisesti verkossa esiintyviin muutosilmiöihin. Usein pientuotannosta syntyvät sähkön laadulliset vaikutukset jäävät pieniksi. Tärkeää on huolehtia, että tuotantolaitoksen tuottama teho ei ole liian suuri, kun sitä verrataan verkon oikosulkutehoon. [6, 6.]

Liittymispisteessä ja pienvoimalassa täytyy varmistaa tärkeimmät sähkön laatu ehdot.

- Jännitemuutokset eivät saa olla liian suuria, kun kytketään tai erotetaan tuotantolaitosta verkosta.
- Jännitetaso on pysyttävä standardin määrittelemissä rajoissa.
- Nopeita jännitteen muutoksia eli välkyntää ei saa esiintyä liian paljon. [6, 6.]

Jännitemuutoksen suuruus, joka aiheutuu pienvoimalan kytkemisestä verkkoon, voidaan laskea yhtälöllä

$$\Delta U = i_{suhde} \cdot \frac{S_n}{S_k} \cdot U_v \quad (1)$$

missä i_{suhde} on pienvoimalan kytkentävirrän suhde nimellisvirtaan
 S_k on verkon oikosulkuteho ensimmäisessä muun kuluttajan kanssa olevassa yhteisessä verkon pisteessä
 S_n on pienvoimalan nimellisteho
 U_v on verkon vaihejännite
 [6, 12.]

Standardin SFS-EN 50160 [7] mukaan jännitemuutos pienvoimalan verkkoon kytkemisessä saa olla enintään 5 %. Suunnittelutasoksi kuitenkin kannattaa ottaa enintään 4 %. Yhtälöstä 1 saadaan johdettua verkon liittymispisteen oikosulkutehon ehto, kun $\Delta U/U_v = 0,04$. Verkkoon kytkeminen pystytään normaalisti sallimaan, jos oikosulkuteho S_k liittymispisteessä toteuttaa yhtälön

$$S_k \geq 25 \cdot i_{suhde} \cdot S_n \quad (2)$$

[6, 12.]

Pienvoimalan lisäksi jännitteen laatuun vaikuttaa pienjänniteverkon jäykkyys. Mitä huonompi pienjänniteverkko ja isompi tuotantolaitos ovat kaukana syöttävästä jakelumuuntajasta, sitä enemmän se voi aiheuttaa muutoksia jännitteessä. Jännitteen nousua ja jännitteenalenemaa voidaan tarkastella tarkemmin seuraavalla yhtälöllä

$$\Delta U = \frac{P_N}{U^2} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \tan \varphi) \quad (3)$$

missä P_N on tuotantolaitoksen nimellisteho
 R on tuotantolaitoksen liittymispisteen ja jakelumuuntajan välisen johdon resistanssi
 X on vastaavan johto-osuuden reaktanssi
 U on alkupään jännite
 $\cos \varphi$ on tuotantolaitoksen tehokerroin
 [8, 52.]

Jännitteenalenema U_h voidaan laskea myös likimääräisyhtälöllä

$$U_h = \sqrt{3} \cdot (I_p \cdot R + I_q \cdot X) \quad (4)$$

missä I_p on kuormitusvirran pätökomponentti $I \cdot \cos \varphi$
 I_q on kuormitusvirran loiskomponentti $I \cdot \sin \varphi$
 R on johto-osan resistanssi
 X on johto-osan reaktanssi
 $\sqrt{3}$ kertoimella tulos saadaan pääjännitteenä
 [9, 40.]

Aurinkosähköjärjestelmää mitoitettaessa, tuotantotehon tulee perustua kuluttajan omaan päiväkulutukseen aurinkoisena vuodenaikana, jolloin auringosta saatava hyöty on suurimmillaan. Mitoituksessa täytyy huomioida myös yhteensopivuus kiinteistö- ja jakeluverkon kanssa. Jakeluverkkoa kuormitettaessa virta kulkee verkon impedanssin läpi aiheuttaen jännitehäviöitä. Kun taas tuotettua energiaa syötetään jakeluverkkoon, syntyy jännitteen nousua. Sitä suurempaa on jännitteen nousu, mitä suurempaa on tuotannon virta ja verkon impedanssi. Pilvien vaikutuksesta aurinkotuotanto voi vaihdella ajoittain nopeasti, joten siitä syntyy jännitteen vaihtelua eli välkyntää muille verkossa oleville kuluttajille. [10, 28–30.]

Sähkön laatua sähköjakeluverkossa on perinteisesti seurattu asiakkaiden energiamittauksella, sähköasemien jännitemittauksilla sekä lähtöjen virtamittauksilla. Sähkön laadun mittauksia on tehty ongelmien esiintyessä pääasiassa siirrettävillä mittalaitteilla. Kaukoluettavilla energiamittareilla pystytään tuntien energiamittausten lisäksi mittaamaan jännitteen laatua, käyttökeskeytyksiä ja taltioimaan saatuja tuloksia. Sähkön laadun mittauksia tehdään yhä enemmän jakeluverkon eri tasoilla niin sähkönkäyttäjien kiinteistöissä kuin jakelumuuntamoilla. Mittauksilla pyritään saamaan kattava kuva sähkön laadun eri osatekijöistä. Taulukossa 1 on esitetty pienjänniteverkon laatukriteerit. Laatumittauksia ja verkostolaskelmia yhdistämällä voidaan selvittää verkon heikkoa tilaa, häiritseviä kuormituksia ja kenen verkossa häiriöiden syyt sijaitsevat. [5, 257.]

Taulukko 1. Sähköenergialiitto Sener ry:n koostetaulukko pienjänniteverkon laatukriteereistä [5, 256].

Jännitteen ominaisuus	Korkea laatu	Normaalilaatu	Standardin SFS-EN 50160 mukainen laatu	Huomatus
Taajuus	50 Hz \pm 0,5 %	50 Hz \pm 1 %	99,5 % vuodesta: 50 Hz \pm 1 % 100 % ajasta 50 Hz + 4 % / -6 %	Mittaus 10 s jaksoina
Jännitetason vaihtelu	220–240 V ja ka. 225–235 V	207–244 V	95 %: $U_n \pm 1$ % kaikki: $U_n + 10$ % / -15 %	Mittaus tehollisarvojen 10 min keskiarvoina viikon ajan
Nopeat jännite- muutokset	$P_{st,3max} \leq 1$ ja $P_{lt,max} \leq 0,8$	$P_{lt,max} \leq 1$	95 % P_{lt} -arvoista ≤ 1	Manuaalisesti myös kuvan 1 avulla
Harmoniset yliaallot	THD ≤ 3 %	$u_h \leq$ taulukon 9.1 arvot ja THD ≤ 6 %	95 % $u_h \leq$ taulukon 9.1 arvot ja THD ≤ 8 %	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Epäsymmetria	$u_{ush} \leq 1$ %	$u_{ush} \leq 1,5$ %	95 % $u_{ush} \leq 2$ %	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Signaalijännitteet	\leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	\leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	99 % \leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	Mittaus 3 s jaksoina 1 vrk

3.2 Pienjänniteverkon suojaaminen

Pienjänniteverkossa olevilla suojauksilla huolehditaan verkossa olevien laitteiden suojausten lisäksi, ettei hengen- ja palovaaran mahdollisuutta pääse syntymään. Tämän vuoksi on hyvä huolehtia varokesuojauksen lisäksi riittävän hyvistä maadoituksista. Maadoitusten tehtävänä on huolehtia, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä pääse tapahtumaan. Kun maadoitukset tehdään kunnolla, ei sähkönkäyttäjällä pääse esiintymään vikatilanteessa vaarallisia kosketusjännitteitä esimerkiksi sähkölaitteen maadoitetun suojuksen ja maan välillä. Suomessa pienjänniteverkko on rakennettu TN-C-järjestelmänä, jossa on yhdistetty nolla- ja suojajohdin eli PEN-johdin. [5, 198–199.]

Pienjänniteverkossa ylikuormitussuojaus ja oikosulkusuojaus toteutetaan gG-sulakkeilla. Liittymiskaapelit ja AMKA-johdot tulee suojata ylikuormitukselta. Maakaapeli-verkko asennetaan usein palonkestäväksi, joten niiltä ei vaadita ylikuormitussuojauksen toteutumista. Mahdollisten kaapelivaurioiden varalta kaikki maakaapelitkin kannattaa suojata ylikuormitussuojauksella. Oikosulkusuojauksessa syötön nopean poisky-

kennän on tapahduttava pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran vaikutuksesta säädetyssä maksimijaksassa. Vikavirran täytyy olla riittävän suuri, että sulake palaa vikatilanteessa nopeasti. Kun oikosulkuvirta on tiedossa, saadaan sulakkeen toiminta-aika luettua käyrästä. Verkon selektiivinen suojaus saavutetaan, kun jätetään yksi sulakeporras väliin peräkkäisten sulakkeiden nimellisvirroista. Pienjänniteverkossa tapahtuvan oikosulun on kytkeydyttävä pois alle viidessä sekunnissa. Verkkoyhtiön omissa verkoissa voidaan harkinnan mukaan käyttää myös pidempiä poiskytkentäaikoja, mutta se ei saa kuitenkaan olla yli 15 sekuntia. [5, 200–201.]

4 Mikrotuotanto

4.1 Mikrotuotannon liittäminen pienjänniteverkkoon

Sähkön mikrotuotannolla tarkoitetaan sähköverkkoon kytkettäviä pieniä sähköntuotantolaitteistoja, joiden ensisijainen tarkoitus on tuottaa sähköä omaan kulutukseen. Sähkönjakeluverkkoon tapahtuva sähkön syöttö on vähäistä. Energiatieteellisuuden teettämän selvityksen mukaan tuotanto on mikrotuotantoa, kun tuotanto liitetään verkkoon enintään $3 \times 16 \text{ A:n}$ sulakkeilla. Maksimitenhoksi voidaan määritellä siten noin 11 kW. Nimellistehoraja mikrotuotantolaitoksella on enintään 100 kVA. Sähköturvallisuusstandardien SFS6002 ja SFS6000 mukaan mikrotuotantolaitoksen tulee olla erotettavissa verkosta. Erotuslaitteessa on oltava näkyvä avausväli tai luotettava mekaaninen asennonosoitus. Erotuslaitteen käyttömekanismiin tulee olla lukittavissa. Jakeluverkon haltijalla tulee olla joko vapaa pääsy erottimelle tai kaukokytkenämahdollisuus. [11, 2–4.]

Verkon huolto- ja korjaustilanteissa on tärkeää todeta verkon jännitteettömyys ja työmaadoittaa työkohte molemmin puolin aina, kun on mahdollista, että pienjänniteverkkoon on liitetty mikrotuotantoa. Mikrotuotantolähdöt tulee merkitä varoituskilvillä asianmukaisesti muuntajiin ja jakokaappeihin. Myös asiakkaan omaan sähköpääkeskukseen merkitään, että siihen on liitetty mikrotuotantoa. Verkonhaltijan on huolehdittava

siitä, että jokainen mikrotuotantolaitos on merkitty myös omiin järjestelmiin. Varoituskilvet tulee sijoittaa siten, että paikalla oleva asentaja tai maallikko havaitsee ne varmasti. [11, 4–5.]

4.2 Mikrotuotantolaitoksen kytkeytyminen ja irtoaminen verkosta

Mikrotuotantolaitoksessa on oltava suojalaitteet, jotka kytkevät tuotantolaitoksen irti yleisestä pienjänniteverkosta, jos verkkosyöttö katkeaa tai jos jännite ja taajuus arvot poikkeavat asetelluista arvoista mikrotuotantolaitteiston navoissa. Mikrotuotantolaitteisto ei saa milloinkaan kytkeytyä verkkoon, jos verkon jännite ja taajuus eivät ole annettujen arvojen rajoissa. Suomalaisessa standardissa SFS-EN 50438 määritellään rajat mikrotuotantolaitoksen verkkoon liittymiselle ja verkosta irtoamiselle (taulukko 2). [11, 6–7.] Pienjänniteverkkoon voidaan liittää myös mikrotuotantoa, joka täyttää vaihtoehtoisesti saksalaisen vaatimuskirjeen VDE-AR-N 4105 2011-8 vaatimukset [12]. Mikrotuotantolaitteiston erottamiseen verkosta käytetään sopivia mekaanisia kontaktoreita tai elektronisia kytkimiä [11, 6–7].

Tuotantolaitoksen tahdistuminen verkkoon on sallittu vain sen jälkeen, kun jännite ja taajuus ovat asetteluehtojen sisällä vähintään tietyn ajan. Asetteluehdot riippuvat siitä, onko kytkentä normaalikäytön käynnistys vai automaattinen jälleenkytkentä suojauksen toimisen jälkeen. Mikrogeneraattorin synkronoiminen pienjännitejakeluverkon kanssa on oltava kokonaan automaattinen. Manuaalisesti tapahtuva kytkimen sulkeminen synkronoimisen suorittamiseksi kahden eri järjestelmän välillä ei saa olla mahdollista. [11, 8.]

Taulukko 2. Tuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvot standardin SFS-EN 50438 mukaan [13, 34].

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
	s	
Ylijännite	0,2	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2	47,5 Hz
Saarekekäytönestosuojaus (LoM) ^{a)}	Toiminta-aika enintään 5 s	

^{a)} Saarekekäytönestosuojauksen (LoM) on perustuttava tunnettuun tekniikkaan, joka soveltuu jakeluverkon suojaukseen.

HUOM. Mikrogeneraattorin erottamisen verkosta on tapahduttava mekaanisia koskettimia käyttäen. Tämän mekaanisen katkaisijan on oltava lukittava erotuskytkin.

Kuluttaja voi käyttää jakeluverkon kanssa rinnan käyvää mikrotuotantolaitosta varavoi-
mana. Järjestelmässä pitää silloin olla asennettuna erillinen kytkin ja laitteisto, jossa
on kaksoiskytkentämahdollisuus. Tällöin kytkennällä voidaan valita toimiiko mikro-
tuotantolaitos rinnan jakeluverkon kanssa vai täysin jakeluverkosta erotettuna saarek-
keena. Mikrotuotantolaitos ei saa missään olosuhteissa syöttää samaan aikaan jake-
luverkkoa ja jakeluverkosta erotettua saareketta. [11, 9.]

4.3 Loss of Mains -suojaus

Loss of Mains (LoM) -tilanteessa, kun jakeluverkon jännite katoaa, on mikrotuotanto-
laitoksen irrottava jakeluverkosta. Saarekekäyttösuojaukseen (LoM) perustuva tek-
niikka on sovelluttava jakeluverkon suojaukseen. Mikrontuotantolaitosta ei voi koskaan
jättää yksin syöttämään saareketta. LoM-suojausta ei tarvita sellaisilla verkkoliityntä-
laitteistoilla, jotka syöttävät verkkoon virtaa pulssimuotoisena eikä vaihtovirtana. Täl-
laiset verkkoliityntälaitteistot eivät kykene jäämään syöttämään saareketta vaan tarvit-
sevat verkon jännitettä tahdistuakseen. Testaukset näille laitteistoille pitää kuitenkin
suorittaa myös LoM-tilanteessa. Saarekkeen kuormien ollessa hyvin lähelle mikro-
tuotantolaitoksen yhteenlaskettua tuotantoa, ei verkkoliityntälaitteisto pysty silloin havait-

semaan LoM-tilannetta ainoastaan jännite- ja taajuus releillä. Tällöin verkkoliityntälaitteisto on varustettava LoM-suojauksella, ettei mikrotuotantolaitos jää yksin syöttämään saareketta. LoM-suojauksen täytyy irrottaa mikrotuotantolaitos nopeasti toiminta-ajan ollessa viisi sekuntia. [11, 8.]

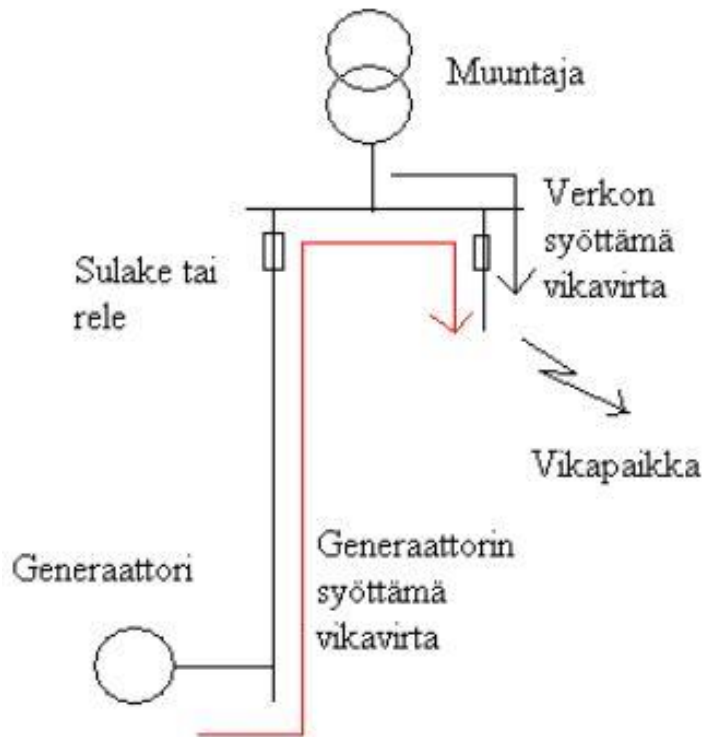
4.4 Mikrotuotantolaitoksen syöttämät oikosulkuvirrat

Mikrotuotantolaitos voi nostaa kokonaisuikosulkuvirtoja vikapaikan läheisyydessä syöttämällä jakeluverkkoon oikosulkuvirtoja. Suuret oikosulkuvirrat hajautetun tuotantolaitoksen läheisyydessä voivat aiheuttaa verkon komponenttien vikaantumisia. Lisääntyneet vikavirrat voivat aiheuttaa ongelmia kaapeliliitoksiin, muuntajiin ja kytkinlaitteisiin. Ongelmiin voidaan reagoida pienentämällä oikosulkuvirtoja. Se tapahtuu jakamalla jakeluverkko pienempiin osiin tai tekemällä muutoksia jakelumuuntajaan. Myös komponenttien vaihtamisella tai vikavirtarajoittimia lisäämällä voidaan hallita oikosulkuvirtoja. [11, 9.]

Jakeluverkkoon liitetyn mikrotuotantolaitoksen syöttämä vikavirta riippuu tuotantolaitoksen ominaisuuksista ja se on yleensä vain vähän sen nimellisvirtaa suurempi. Jos tuotantolaitos on liitetty jakeluverkkoon taajuusmuuttajan välityksellä, silloin vikavirtaa rajoittavat sen tekniset ominaisuudet. Mikrotuotantolaitoksen maksimivikavirran suuruudesta voidaan arvioida tuotantolaitoksen verkostovaikutuksia. [11, 9.]

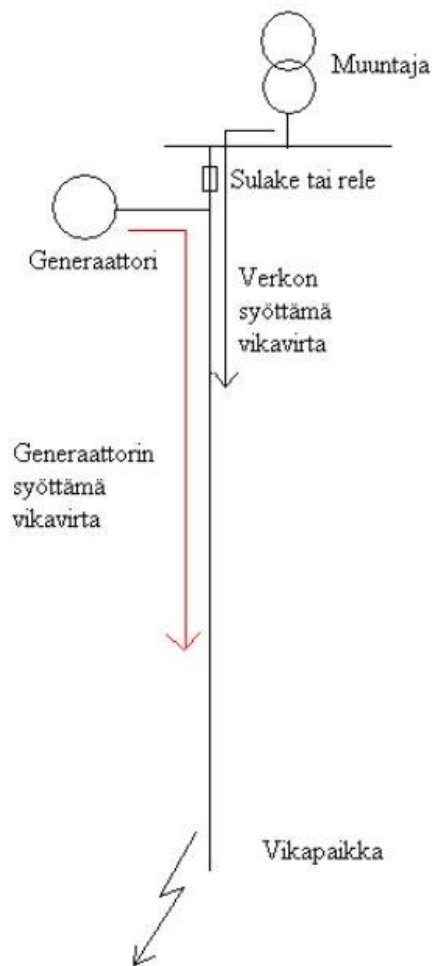
Mikrotuotantolaitoksen syöttämä vikavirta voi johtaa jakeluverkon suojauksen väärin toimiseen, jos mikrotuotanto määrät lisääntyvät. Tapaukset, joissa jakeluverkon suojaus voi toimia väärin, ovat virhelaukaisu ja suojauksen sokaistuminen. [11, 10.]

Virhelaukaisussa oikosulkuvian syntyessä sellaisen muuntajan syöttöön, jossa toiselle syötölle on liitetty hajautettua tuotantoa, voi ylivirtasuojaukset toimia väärin mikrotuotantolaitoksen puoleisessa verkon osassa. Virheellinen toiminta johtuu siitä, että vikavirran suuruus ylittää ylivirtasuojan kapasiteetin tunnistamatta vikavirran suuntaa, kun myös mikrotuotantolaitos osallistuu vikavirran syöttämiseen vikapaikkaan. Kuva 3 havainnollistaa ylivirtasuojauksen väärin toimimista. [11, 10.]



Kuva 3. Virhelaukaisu [11, 10].

Suojauksen sokaistumisessa mikrotuotantolaitoksen vikavirrat voivat häiritä jakeluverkon suojauksen toimintaa. Vian tapahtuessa sellaisessa paikassa, jossa mikrotuotantolaitos jää syötön ja vikapaikan väliin, voi suojaus jäädä reagoimatta. Tämä johtuu siitä, kun mikrotuotantolaitos osallistuu vikavirran syöttämiseen vikapaikkaan syötön lisäksi. Kuva 4 havainnollistaa suojauksen sokaistumista. Mikrotuotantolaitoksien lisääntyessä jakeluverkon nousuilla, voi syötön syöttämä oikosulkuvirta laskea niin alas, ettei lähdön ylivirtasuojaus muuntajalla enää reagoi. [11, 11–12.]



Kuva 4. Suojauksen sokaistuminen [11, 11].

5 Mikrogeneraattori

5.1 Mikrogeneraattorin rinnan käyttö pienjänniteverkon kanssa

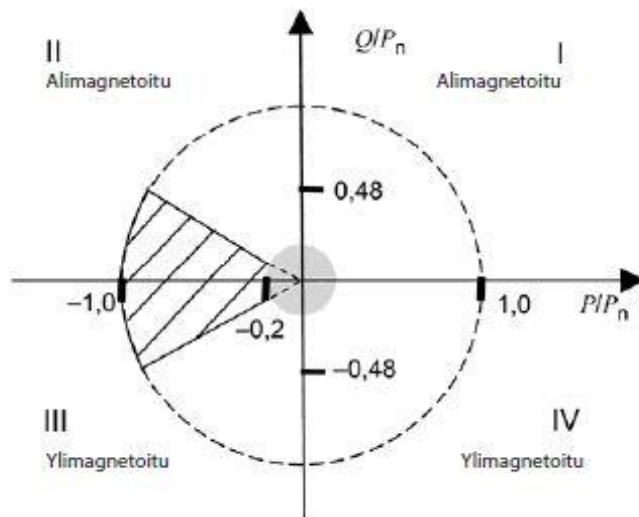
Standardissa SFS-EN 50438 määritellään tekniset vaatimukset mikrogeneraattoreille, kun ne toimivat rinnan yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa. Standardi SFS-EN 50438 koskee mikrogeneraattoreita riippumatta siitä, mikä on kunkin mikrogeneraattorin käyttöenergian lähde. Standardissa SFS-EN 50438 mikrogeneraattoreilla tarkoitetaan laitteita, joiden nimellisvirta vaihetta kohti on maksimissaan 16 A:n yksi- tai useampivaiheisessa $230/400\text{ V:n}$ verkossa. [13, 7.]

5.2 Invertteriin perustuva mikrogeneraattori

Mikrogeneraattorin on kyettävä toimimaan koko ajan verkossa, kun taajuus liitoskohdassa kestää alueella $49\text{ Hz}–51\text{ Hz}$. Mikrogeneraattorin on lisäksi kyettävä toimimaan vähimmäisaikajakson 30 minuuttia verkossa taajuuden ollessa $47,5–49,0\text{ Hz}$ ja $51,0–51,5\text{ Hz}$. Mikrogeneraattorin on pystyttävä toimimaan katkaisematta jännitettä, kun jännite liitoskohdassa pysyy alueella $0,85\text{ Un}–1,1\text{ Un}$. [13, 15–17.]

Mikrogeneraattorin on toimittava tällä jännitealueella seuraavilla loistehon vaihtelualueilla.

- Seuraamalla jakeluverkkoyhtiön osoittamaa käyrää tehokertoimien $\cos \varphi = 0,90$ alimagnetoitu (kapasitanssi) ... $0,90$ ylimagnetoitu (induktanssi) vaihtelualueella silloin, kun mikrogeneraattorin lähtöpätöteho on isompi tai sama kuin 20% sen nimellispätötehosta.
- Loistehoa ei syötetä enemmän kuin 10% mikrogeneraattorin nimellispätötehosta, jos lähtöpätöteho on alle 20% sen nimellispätötehosta. Kuva 5 havainnollistaa loistehon vaihtelualueita erilaisilla kuormilla. [13, 18.]



Kuva 5. Loistehon voimakkuus erilaisilla kuormilla [13, 18].

Mikrogeneraattorin toiminnan ollessa alimagnetoitua, mikrogeneraattori kuluttaa vareja ja vastaavasti toiminnan ollessa ylimagnetoitua, mikrogeneraattori tuottaa vareja [13, 18].

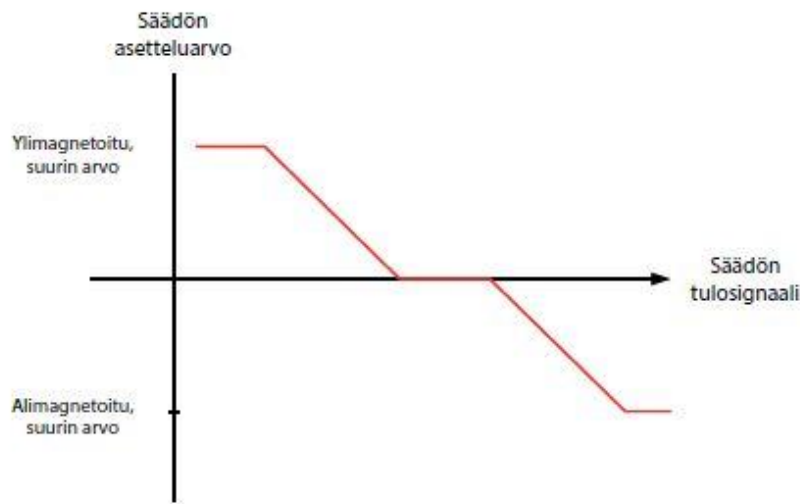
Karppanen [8] on selvittänyt diplomityössään verkkoinvertterin säätömahdollisuuksia ja niiden vaikutuksia jakeluverkon sähkön laatuun. Sääto voi tapahtua Karppasen [8] mukaan taajuustukena ylituotantotilanteessa, jolloin pätötehoa säädetään alassäätönä tai sitten jännitetukena, jolloin loistehoa säädetään ylös- tai alassäätönä.

5.3 Mikrogeneraattorin ohjaustavat

Mikrogeneraattorin on kyettävä toimimaan seuraavilla ohjaustavoilla.

- $\cos \varphi$ on vakio. Tässä ohjaustavassa mikrogeneraattorin ulostulo pidetään pätötehokertoimen $\cos \varphi$ asetellussa vakioarvossa.
- Jännitteestä riippuva loisteho $Q (U)$. Tällöin loistehoa säädetään jännitteen funktiona.
- Pätötehosta riippuva tehokerroin $\cos \varphi (P)$. Tässä mikrogeneraattorin ulostulon pätötehokerrointa säädetään pätötehon ulostulon funktiona. [13, 19–20.]

Loisteho on oltava säädettävissä kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Loistehon säätö [13, 19].

Ohjaustapojen on oltava kytkettävissä päälle ja pois sekä aseteltavissa kenttäolosuhteissa. Jakeluverkon haltijan on huolehdittava siitä, että luvattomat asetellut kenttäolosuhteissa suojataan sinetillä tai salasanaalla. Mikrogeneraattorin erottamiseen verkosta käytetään mekaanisia koskettimia ja tämän katkaisijan pitää olla lukittava. Jakeluverkon haltija määrittelee tavan, miten loisteho osallistuu jännitteen säätöön. Jos jakeluverkon haltijalla ei ole käytössä mitään ominaiskäyrää, on mikrogeneraattorin toimitettava pätötehokertoimella $= 1$. [13, 19.]

Kompensoinnilla voidaan pienentää kokonaisvirtaa ja jakeluverkon pätötehohäviöitä. Kompensoinnilla pystytään vaikuttamaan myös jännitteen alenemaan, koska jännitteen alenema on riippuvainen kuormituksen virrasta ja kompensoinnilla voidaan laskea kuorman ottamaa loisvirtaa. [14, 2.]

Verkkoinvertterillä on mahdollista säätää jännitettä loistehon avulla (kuva 7). Suomessa on käytössä alla olevan kuvan mukainen DE1 säätö, jossa loistehonkompensointia ei käytetä. DE2 ja DE3 säätää sitten 100 %:n teholla $\cos\varphi$:n ollessa $-0,95$ tai $-0,9$. Säätö tapahtuu lineaarisesti 50 %:n tehosta 100 %:n tehoon. [15.]

Setup DE1				Setup DE2				Setup DE3			
Abschaltung Netzspannung:				Abschaltung Netzspannung:				Abschaltung Netzspannung:			
UILmin.	184,0V			UILmin.	184,0V			UILmin.	184,0V		
UILmax.	264,5V			UILmax.	264,5V			UILmax.	264,5V		
UIL max TripTime	5 cycle	100ms		UIL max TripTime	5 cycle	100ms		UIL max TripTime	5 cycle	100ms	
UIL min TripTime	5 cycle	100ms		UIL min TripTime	5 cycle	100ms		UIL min TripTime	5 cycle	100ms	
Abschaltung Netzfrequenz:				Abschaltung Netzfrequenz:				Abschaltung Netzfrequenz:			
FILmin.	47,5Hz			FILmin.	47,5Hz			FILmin.	47,5Hz		
FILmax.	51,5Hz			FILmax.	51,5Hz			FILmax.	51,5Hz		
FreqIL max TripTime	5 cycle	100ms		FreqIL max TripTime	5 cycle	100ms		FreqIL max TripTime	5 cycle	100ms	
FreqIL min TripTime	5 cycle	100ms		FreqIL min TripTime	5 cycle	100ms		FreqIL min TripTime	5 cycle	100ms	
Max. Netzspannung im 10-Minuten Mittel:				Max. Netzspannung im 10-Minuten Mittel:				Max. Netzspannung im 10-Minuten Mittel:			
ULL	253,0V			ULL	253,0V			ULL	253,0V		
Zuschaltzeit:				Zuschaltzeit:				Zuschaltzeit:			
GMTi	60 sec.			GMTi	60 sec.			GMTi	60 sec.		
Wiederzuschaltzeit:				Wiederzuschaltzeit:				Wiederzuschaltzeit:			
GMTr	60 sec.			GMTr	60 sec.			GMTr	60 sec.		
Q-Mode (cos phi (P)):				Q-Mode (cos phi (P)):				Q-Mode (cos phi (P)):			
Punkte	cos phi	P (%)		Punkte	cos phi	P (%)		Punkte	cos phi	P (%)	
P0		1	0	P0		1	0	P0		1	0
P1		1	0	P1		1	0	P1		1	0
P2		1	50	P2		1	50	P2		1	50
P3		1	100	P3		-0,95	100	P3		-0,9	100
Frequenzabhängige Wirkleistungsreduzierung:				Frequenzabhängige Wirkleistungsreduzierung:				Frequenzabhängige Wirkleistungsreduzierung:			
GFDPR _e	50,2Hz			GFDPR _e	50,2Hz			GFDPR _e	50,2Hz		
GFDPR _v	40%/Hz			GFDPR _v	40%/Hz			GFDPR _v	40%/Hz		
Softstart:				Softstart:				Softstart:			
GPIS	0,16%/sec.			GPIS	0,16%/sec.			GPIS	0,16%/sec.		
Zuschaltung Netzspannung:				Zuschaltung Netzspannung:				Zuschaltung Netzspannung:			
U Reconnect min.	195,5V			U Reconnect min.	195,5V			U Reconnect min.	195,5V		
U Reconnect max.	253V			U Reconnect max.	253V			U Reconnect max.	253V		
Zuschaltung Netzfrequenz:				Zuschaltung Netzfrequenz:				Zuschaltung Netzfrequenz:			
F Reconnect min.	47,5Hz			F Reconnect min.	47,5Hz			F Reconnect min.	47,5Hz		
F Reconnect max.	50,05Hz			F Reconnect max.	50,05Hz			F Reconnect max.	50,05Hz		

Kuva 7. Loistehon säätö verkkoinverterillä [15].

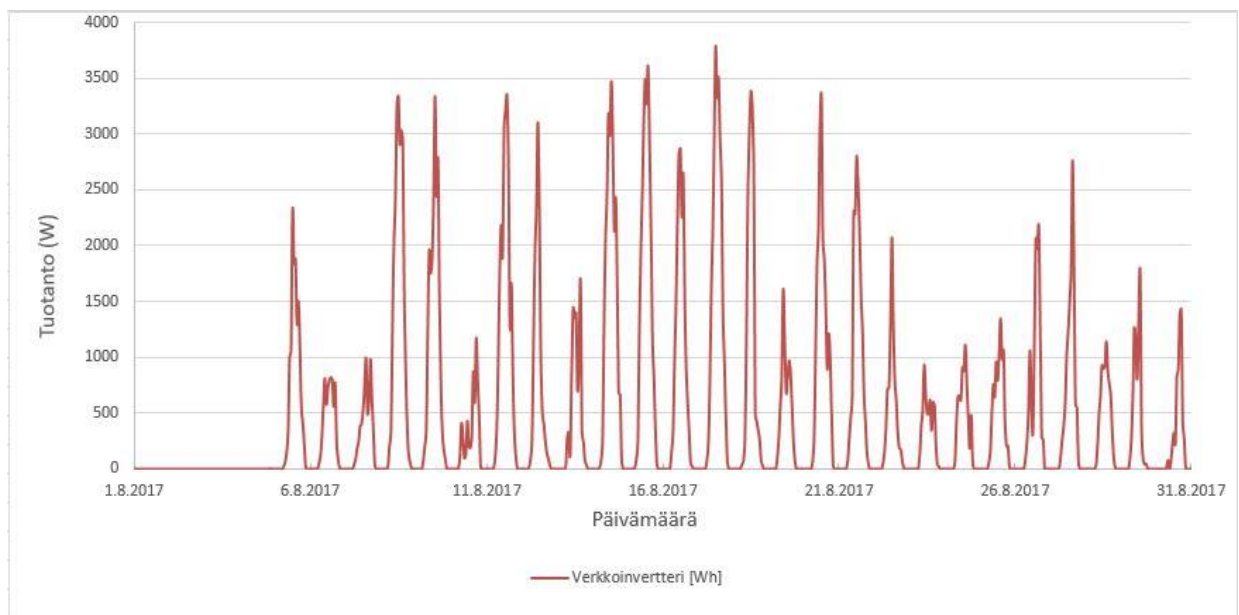
6 Esimerkkikohde

6.1 Aurinkosähköjärjestelmä

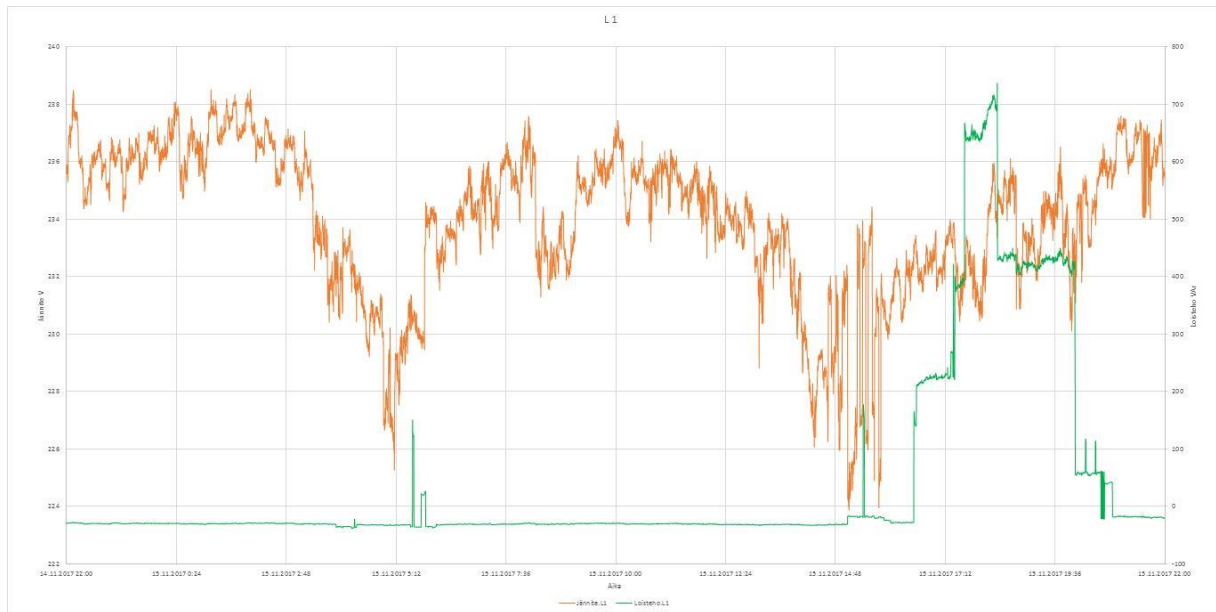
Aurinkosähköjärjestelmä, jonka mittautietoja tässä työssä on tarkasteltu, sijaitsee Kuopion Siilinjärvellä. Kohde on käyttötarkoitukseltaan omakotitalo, joka sisältää normaalit omakotitalon sähkölaitteet. Omakotitaloon on asennettu sähkönjakeluverkkoon kytkettävä aurinkosähköjärjestelmä. Aurinkosähköjärjestelmän koko on $20 \times 260 \text{ Wp}$ voimalatehon ollessa 5200 Wp . Järjestelmässä on 20 kappaletta monikidepaneeleita, joiden pinta-ala on yhteensä 33 m^2 . Verkkoinvertertinä toimii nimelliseltä AC-teholtaan 5800 W:n verkkoinverterti. Kohteen liityntäpisteessä oikosulkuvirta on 778 A ja kohteeseen on asennettu erillinen energiamittari verkkoyhtiön mittauksen jälkeen. Erillisellä energiamittauksella saadaan tarkempaa tietoa sähkön laadusta kiinteistön käyttöön kuin verkkoinverteriltä olisi saatavilla.

6.2 Mittaus

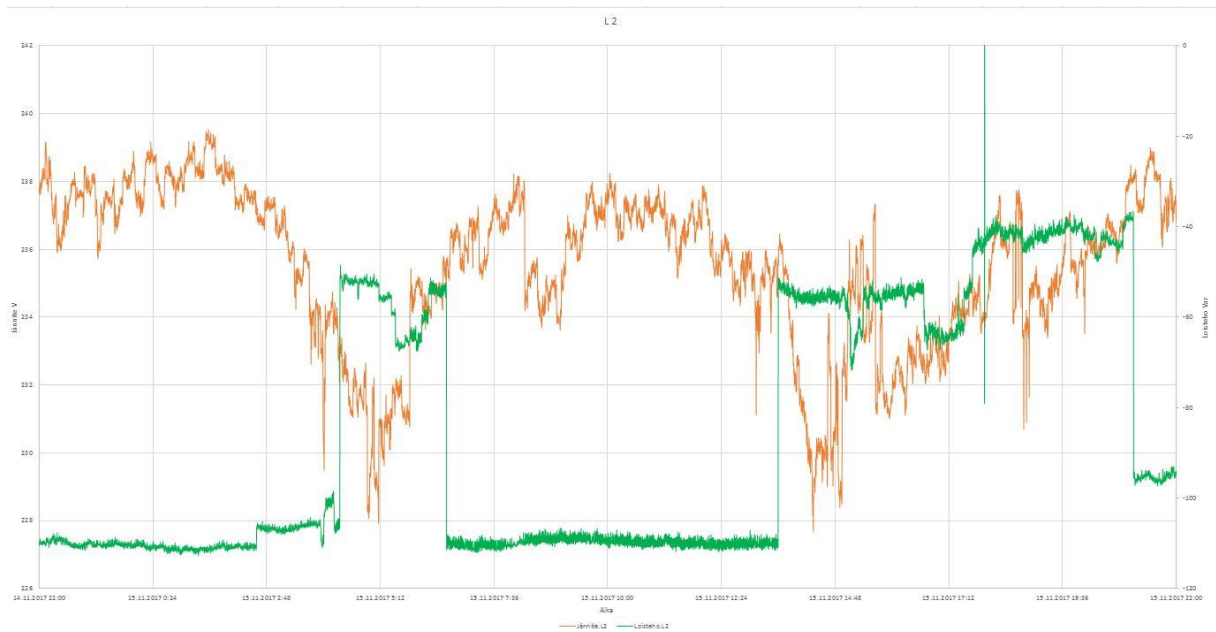
Työssä tarkasteltiin verkkoinvertterin (kuva 8) ja erillisen energiamittarin (kuvat 9, 10 ja 11) mittaustuloksia. Mittauksia voidaan hyödyntää tutkittaessa aurinkovoimalan verkostovaikutuksia jakeluverkon näkökulmasta. Mittaustuloksista otettiin lähempään esimerkki tarkasteluun elokuulta ja marraskuulta 2017 kerättyjä tietoja. Verkkoinvertteriltä saatiin elokuun 2017 aurinkosähköjärjestelmän tuotantotiedot tunnin tarkkuudella (kuva 8). Erilliseltä energiamittarilta, joka oli asennettuna verkkoyhtiön mittauksen jälkeen, saatiin mittaustietoina vaihekohtaisesti vuorokauden tiedot kymmenen sekunnin keskiarvolla marraskuulta 2017. Energiamittarin luennan piirissä olivat jännite, virta, pätöteho ja loisteho sekä verkon taajuus kaikkien vaiheiden keskiarvona. Mittauksilla, jotka ovat vasta pilotointivaiheessa, voidaan selvittää, miten mittaustietoja pystytään tulevaisuudessa hyödyntämään paikallisesti sähkön laadun tarkkailussa.



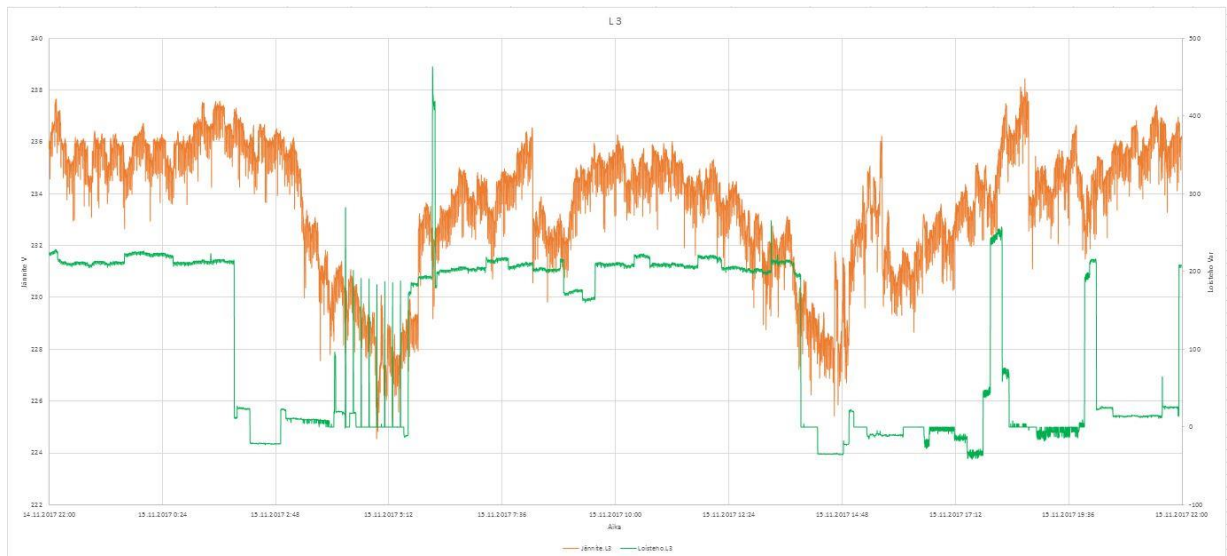
Kuva 8. Elokuun 2017 energiantuotanto



Kuva 9. L 1 vaiheen loisteho ja jännite



Kuva 10. L 2 vaiheen loisteho ja jännite



Kuva 11. L 3 vaiheen loisteho ja jännite

6.3 Laskuesimerkkejä

Liittämiskohdan oikosulkuteho S_k

Lasketaan liittämiskohdan oikosulkuteho S_k . Oletetaan, että tuotantolaitos ei ota nimellivirtaansa suurempaa kytkentävirtaa. Tällöin i_{suhde} on melkein 1. Oikosulkuvirta $I_k = 778 \text{ A}$. $S_k = 3 \cdot I_k \cdot U_v = 3 \cdot 778 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} = 536,8 \text{ kVA}$. Liittymään voitaisiin liittää suurimmillaan $S_n = \frac{536,8 \text{ kVA}}{25} = 21,47 \text{ kVA}$ suuruinen tuotantolaitos.

Oikosulkuvirran laskenta oikosulkutehon S_k avulla

Näillä laskukaavoilla voidaan tarkastella muuntajan ja generaattorin syöttämää vikavirtaa ja jakeluverkon suojauksen väärintoimimista. Missä $S_k = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k$, muuntaja $Z_k = \frac{S_n}{Z_k}$ ja generaattori $Z_k = \frac{S_n}{X_d}$. Oikosulkutehot rinnan lasketaan $S_k = S_{k1} + S_{k2}$ ja oikosulkutehot sarjassa lasketaan $\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}}$.

Vikapaikan oikosulkuvirran I_k laskenta ominaisoikosulkutehojen S_k avulla

Vikapaikassa muuntajan oikosulkuteho ja mikrotuotantolaitoksen oikosulkuteho ovat rinnan, missä muuntaja $Z_k = 10 \%$, $S_n = 50 \text{ kVA}$, $S_{km} = \frac{S_n}{Z_k}$, $S_{km} = 500 \text{ kVA}$ ja generaattori $X_d = 12 \%$, $S_n = 5,2 \text{ kVA}$, $S_{kg} = \frac{S_n}{X_d}$, $S_{kg} = 43,3 \text{ kVA}$. Kokonaisoikosulkuteho $S_k = S_{km} + S_{kg}$. Tällöin saadaan tulos $S_k = 543,3 \text{ kVA}$. Oikosulkuvirta $I_k = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \text{ kV}}$, oikosulkuvirraksi I_k saadaan $784,19 \text{ A}$.

Suurin sallittu johtopituus l

Vikapaikan oikosulkuvirta $I_k = 784,19 \text{ A}$. Sulake muuntajalla $gG 63 \text{ A}$. Sulakkeen pienin toimintavirta enintään viiden sekunnin poiskytkentä ajalla on 320 A . Tuotantolaitos syöttää 30 A:n oikosulkuvirran. Vikapaikkaa syöttävä johto on $AMKA 3 \times 35 + 50$, jonka kannatinköyden impedanssi $Z = 0,800 \Omega/\text{km}$.

Lasketaan verkon kokonaisimpedanssi Z . $Z_{verkko} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 784,19 \text{ A}} = 0,280 \Omega$.

Lasketaan suurin sallittu johtopituus l . $l = \frac{\frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} - Z_v}{2 \cdot z} = \frac{\frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 320 \text{ A}} - 0,280 \Omega}{2 \cdot 0,800 \Omega} = 253 \text{ m}$.

7 Pohdinta

Mittauksilla selvitettiin, kuinka mittaustietoja pystyy hyödyntämään pienjänniteverkon sähkön laadun tarkkailussa. Erillisen energiamittarin mittaustiedoista (kuvat 9,10 ja 11) voidaan havaita, että jos loistehoa siirretään jakeluverkkoon, syntyy jännitteen nousua. Jännite taas laskee, jos loistehoa otetaan jakeluverkosta. Toisin sanoen loistehoa säätelämällä voidaan vaikuttaa jännitteen laatuun.

Verkkoinvertterin avulla loistehoa on mahdollista säätää ja tällöin vaikuttaa suoraan jännitevaihteluihin. Loistehon ollessa negatiivista, generaattori tuottaa loistehoa ja jännite nousee. Loistehon ollessa induktiivista eli positiivista, kuorma kuluttaa loistehoa ja silloin jännite laskee.

Erillisen energiamittarin ja verkkoinvertterin mittaustietoja yhdistämällä saadaan tietoa aurinkosähkölaitteiston toiminnasta kiinteistön omistajalle sekä verkkoyhtiölle. Näillä tiedoilla saadaan kaikki mahdollinen hyöty aurinkosähkötalotilasta asiakkaalle. Samalla voidaan vaikuttaa ja tarkastella pienjänniteverkon sähkön laatua.

Sähkön laatuvahtoja ja niiden täyttymistä pientuotantolaitoksen liityntäpisteessä tarkasteltiin tässä opinnäytetyössä laskuesimerkin avulla. Tuloksena saatiin selville, että kyseiseen liityntäpisteeseen on mahdollista liittää suurempikin pientuotantolaitos. Jakeluverkon suojauksen toimintaa tarkasteltiin lähemmin muuntajan rinnan käyttö kaavojen ja laskuesimerkkien avulla. Johtopäätöksenä todentakoon, että ongelmia ei todennäköisesti pääse syntymään, jos muuntajan nimellisteho on suurempi kuin pienjänniteverkossa sijaitsevien generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho. Laskukaavojen avulla voidaan tarkastella pienjänniteverkon teknistä mitoitus- ja laatuolosuhteita.

Mittaustuloksia ja niiden ottamista lähempään tarkasteluun olisi tämän opinnäytetyön aihealueen puitteissa ollut tarjolla monia eri vaihtoehtoja. Tässä opinnäytetyössä mittausesimerkeiksi valikoituivat tuotantotiedon mittaus sekä loistehon vaikutus jännitteeseen. Erityisesti loistehon vaikutusta jännitetason heilahteluihin pystyi hyvin havainnoimaan mitattujen arvojen perusteella. Erillisen energiamittarin ja invertterin mittaustietoja pystyy hyvin hyödyntämään tulevaisuudessa sähkönjakeluverkon laadun tarkkailussa, mutta koska mittaukset ovat vasta pilotointivaiheessa, on tässä opinnäytetyössä tuotu esille erilaisia mittausmahdollisuuksia. Yhtenä vaihtoehtona olisi voinut olla myös erillisen energiamittarin sijoittaminen jakeluverkon eri kohtiin kuten muuntajaan. Tällöin tietoa sähkön laadusta olisi saatu laajemmin koko pienjänniteverkon alueelta.

Aihepiiriin yhtenä jatkotutkimustyönä on hyvä selvittää verkkoinvertterin mahdollisuutta osallistua jännitteen säätöön loistehon avulla. Toisena jatkotutkimusaiheena voisi tarkastella kaikkia erillisen energiamittarin mittaustietoja sekä yhdistää niitä verkkoinvertterin mittaustietoihin. Lisäksi mittalaitteiden sijoittamisella pienjännitejakeluverkon eri kohtiin saadaan paikallista tietoa sähkön laadusta laajemmalla alueella. Näin ollen myös tätä aihealuetta voidaan jatkojalostaa kolmantena jatkotutkimusaiheena opinnäytetöissä.

Pientuotantomuotojen lisääntyessä, kun asiakkaat haluavat ympäristöystävällisimpiä ja edullisempia energiantuotantomuotoja, on verkkoyhtiöiden myös vastattava haasteeseen. Tämä antaa jakeluverkon parissa työskenteleville yrityksille mahdollisuuden olla mukana kehittämässä omaa toimintaympäristöään ja olla vaikuttamassa, ettei ongelmia jakeluverkossa pääse syntymään.

Lähteet

1. Voimatel Oy. Voimatel yrityksenä. 2017. [Viitattu 7.7.2017]. Saatavissa: <http://www.voimatel.fi/fi/voimatel-yrityksena/>
2. Tahkokorpi, M. Auringon perustiedot. Teoksessa Tahkokorpi, M., Erat, B., Hänninen, P., Nyman, C. Rasinkoski, A. & Wiljander, M. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki. 2016. S. 11–22. ISBN: 978-952-264-663-7.
3. Kämpylehto, J. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki. 2016. 207 s. ISBN: 978-952-264-528-9.
4. SFS 6000-7-712:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-712: erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät. Helsinki. 2017. 27 s.
5. Lakervi, E. & Partanen J. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki. 2009. 295 s. ISBN 978-951-672-359-7.
6. Sähköenergialiitto ry Sener. Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon. 2001. 25 s. [Viitattu 17.7.2017]. Saatavissa: <https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittaminen/TSV-urakoitsijalle/Documents/Pienvoimaloidenliittaminenjakeluverkkoon.pdf>
7. SFS-EN 50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki. 2010. 63 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.
8. Karppanen, J. Sähköntuotannon pienjänniteverkkoon liittäminen – määräykset ja sähköturvallisuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötötekniikka. Teknillinen tiedekunta. Lappeenranta. 2012. 137 s. [Viitattu 1.8.2017.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201205295642>
9. Lakervi, E. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Helsinki. 1996. 110 s. ISBN 951-672-220-2.
10. Suurinkeroinen, S. Pientuotanto on mitoitettava kiinteistö- ja jakeluverkkoon sopivaksi. Sähköala. 2017. Vol. 60:4. S. 28-30. ISSN 0789-5437.
11. Energiateollisuus. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Verkostosuositus YA9:13. 2016. 18 s. [Viitattu 14.7.2017]. Saatavissa: https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf.
12. Energiateollisuus. Energiateollisuus ry:n suosittama yleistietolomake. Pientuotantolaitteiston ja/tai sähkövaraston liittäminen sähköverkkoon. 2018. Päivitetty 1.3.2018. [Viitattu 9.3.2018.] Saatavissa: https://energia.fi/files/2238/Pientuotannon_yleistietolomake_paivitetty_20180103.pdf
13. SFS-EN 50438. Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille. Helsinki. 2015. 141 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.
14. ST- kortisto 52.15 Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. Espoo. 2016. 6 s.
15. Smolander, H. Loistehon säätö verkkoinvertterillä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Pentti Pussinen. Lähetetty 16.11.2017.
16. ST- käsikirja 40 Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Espoo. 2017. 139 s.

Aurinkosähköjärjestelmän sähkökaavio [16, 125.]

